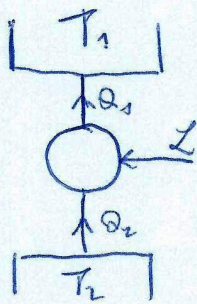


Impianti a ciclo inverso

Si chiamano inversi quei cicli che non sono mirati a produrre lavoro, ma anzi ne consumano per trasferire calore da una sorgente più fredda a una più calda. Operano dunque contro lo spontaneo trasferimento di calore da un corpo più caldo a uno più freddo. Sono usati per frigoriferi, pompe di calore, condizionatori, piastre di pattinaggio, ecc.

Il ciclo inverso di riferimento è il ciclo inverso di Carnot:



$$T_1 > T_2$$

$$\begin{aligned} \text{COP}_f &= \frac{Q_2}{|L|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{1}{\frac{|Q_1|}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1} = \\ &= \frac{T_2}{T_1 - T_2} \end{aligned}$$

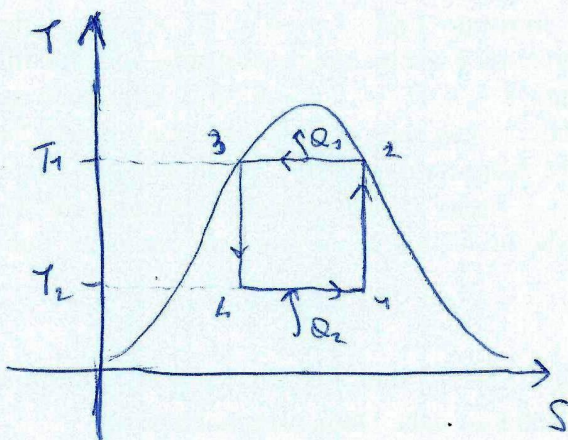
$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{HP}} &= \frac{Q_1}{|L|} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} = \frac{1}{1 - \frac{Q_2}{|Q_1|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1}} = \\ &= \frac{T_1}{T_1 - T_2} \end{aligned}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = 1 + \text{COP}_f$$

Sono i coefficienti di prestazione che abbiamo già introdotto in precedenza. Esiste infine il consumo meccanico specifico γ_0 :

$$\gamma_0 = \frac{|L|}{Q_2} = \frac{-(Q_1 + Q_2)}{Q_2} = -\frac{Q_1}{Q_2} - 1 = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Graficamente il ciclo inverso di Carnot è rappresentabile da:

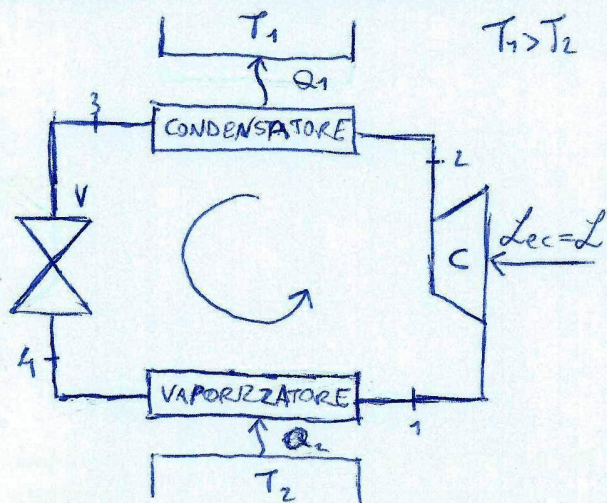


1-2 e 3-4 adiabatiche

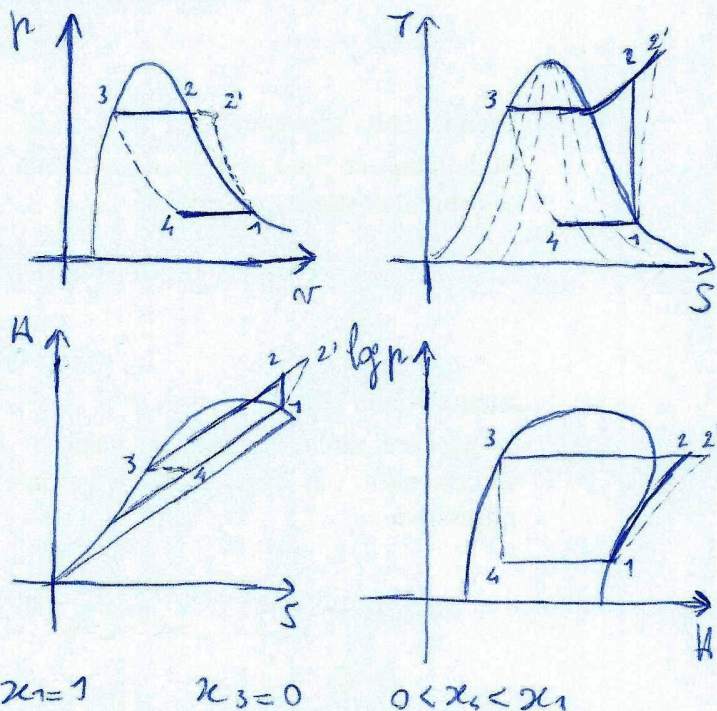
2-3 e 4-1 isoterme

Ciclo frigorifero e compressione di vapore

L'uso di gas presenta considerevoli problemi tecnici. Si preferisce allora usare un fluido che cambia stato; vaporizza col calore sottratto alla temperatura più bassa e condensa rilasciando il calore alla temperatura elevata. L'alta entalpia di passaggio di stato consente di ridurre la portata massica envolvente e l'elevata conversione termica consente di ridurre le superfici di scambio. Schematicamente e graficamente:



V = VALVOA DI LAMINAZIONE
C = COMPRESSORE



$$x_1 = 1$$

$$x_3 = 0$$

$$0 < x_4 < x_1$$

All'ingresso del vaporizzatore (4), il fluido è nello stato di vapore saturo. Sottrae calore alla sorgente inferiore e vaporizza completamente uscendo nello stato di vapore con titolo $x_1 = 1$ (1). Successivamente viene compresso isentropicamente fino allo stato di vapore saturo secco, con temperatura maggiore di quella dello stato 1. Qui la pressione cresce. Nel condensatore il fluido condensa completamente e diviene liquido (3) cedendo calore all'esterno. La valvola di laminazione porta il fluido nello stato iniziale di vapore saturo, riducendone notevolmente la pressione. Si preferisce non usare un espansore come quelli dei cicli motori poiché esso produrrebbe un lavoro inibito in confronto a quello speso per la compressione ($|L_{ec}| > |L_{es}|$, $L_e = -\int_3^4 v dp$).

Notiamo che la temperatura di condensazione deve essere qualche grado superiore a T_1 , mentre la temperatura di vaporizzazione deve essere qualche grado inferiore a T_2 . In tal modo possono verificarsi gli scambi termici necessari.

Nella molecola di compressione si ha:

$$\underbrace{dQ}_{=0} - \underbrace{dLe}_{=0} = \underbrace{dT}_{\leq 0} + \underbrace{d\left(\frac{U}{2}\right)}_{\leq 0} + \underbrace{q dz}_{\leq 0} \Rightarrow dT = 0$$

Quindi:

$$dT = T dS + v dp = 0 \Rightarrow T dS = -v dp \Rightarrow \underbrace{dQ}_{=0} + T dS = -v dp$$

$$\Rightarrow T dS = -v dp \Rightarrow T_m \Delta S_{3,4} = - \int_3^4 v dp$$

Coefficienti di prestazione e consumi meccanici specifici sono:

$$COP_f = \frac{Q_2}{|L|} = \frac{H_1 - H_4}{H_{2'} - H_1}$$

$$COP_{HP} = \frac{|Q_1|}{|L|} = \frac{H_{2'} - H_3}{H_{2'} - H_1}$$

$$\gamma_f = \frac{H_{2'} - H_1}{H_1 - H_4}$$

$$\gamma_{HP} = \frac{H_{2'} - H_1}{H_{2'} - H_3}$$

Potenza del compressore e flussi termici sono:

$$P_c = \dot{m}_R (H_1 - H_2) = \dot{m}_R \cdot \frac{H_1 - H_2}{\rho_c}$$

$$q_{cond} = \dot{m}_R (H_3 - H_{2'}) < 0$$

$$q_{HP} = \dot{m}_R (H_1 - H_4) = \dot{m}_R r (1 - x_4)$$

In cui r è la differenza tra entalpia di vapore ed entalpia del liquido a una certa temperatura e pressione. Va moltiplicata per la differenza di titolo.

Caratteristiche dei fluidi frigorigeni

I cicli frigorigeni usano fluidi che devono avere caratteristiche ben definite, proprio come quelli dei cicli Rankine!

- temperatura termodinamica critica molto superiore a quella di condensazione affinché si operi con valori elevati dell'entalpia di passaggio di stato;
- temperatura del punto triplo molto al di sotto di quella di vaporizzazione affinché il fluido non congeli;
- pressione di condensazione (massima del ciclo) non troppo elevata per ridurre il lavoro di compressione;
- pressione di vaporizzazione non troppo bassa e superiore a quella atmosferica per evitare la pressurizzazione dell'impianto. Se l'impianto è pressurizzato si rischia l'ingresso di aria che ghiaccia nella valvola di laminazione;
- entalpia di passaggio di stato h elevata:

$$Q_{\text{cond}} = \dot{m}_R \cdot h (1 - x_4)$$

In tal modo si riduce la portata massica involvente $\dot{m}_R$;

- calore specifico del liquido c_L ridotto;
- volume specifico all'ingresso del compressore piccolo. In tal modo si riduce la portata volumetrica, $\dot{V}_{R1} = \dot{m}_R \cdot v_1$, e il lavoro netto del compressore. Si vuole massimizzare l'effetto frigorigeno specifico $EFS = \frac{Q_2}{\dot{V}_1}$. Tuttavia se esso cresce troppo aumentano eccessivamente temperatura critica e calore specifico.

Dal punto di vista chimico-ambientale bisogna tenere conto di:

- scarsa reattività e non infiammabilità;
- compatibilità coi materiali (metalli, elastomeri e lubrificanti);
- ODP = 0 (ozone depletion potential): assenza di cloro;
- GWP piccolo (greenhouse warming potential): riduzione del contributo all'effetto serra (per i trasporti $GWP < 150$).

Ecco alcuni fluidi:

NATURALI

NH_3 (ammoniaca)
 CO_2 (anidride carbonica)
 HC (idrocarburi)
 H_2O (acqua)
aria

NH_3 : R-717

CO_2 : R-744

isobutano : R-600a

propano : R-290

SINTETICI

HFC (idrofluorcarburi)

FC (fluorcarburi)

miscela di HFC e FC

HFO (idrofluoroolefine)

HFE (idrofluoroesteri)

HFC: R-134a (frigoriferi domestici)

HFC: R-410a (condizionatori)

HFC: R-507 (frigoriferi industriali)

HFC: R-508a (frigoriferi industriali)

Al di sotto della linea orizzontale sono riportati i nomi tecnici corrispondenti (R-...) per i naturali e alcuni tra gli HFC per i sintetici.

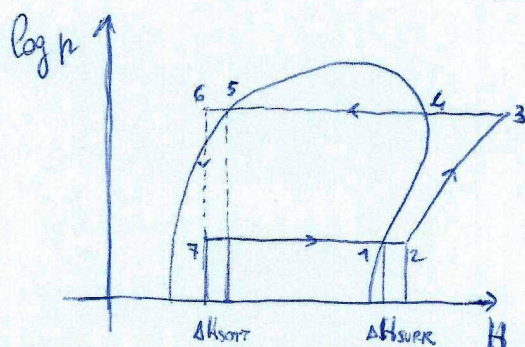
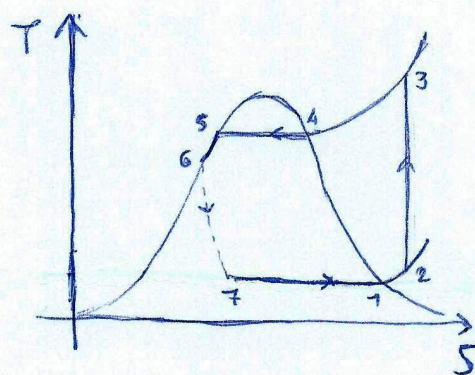
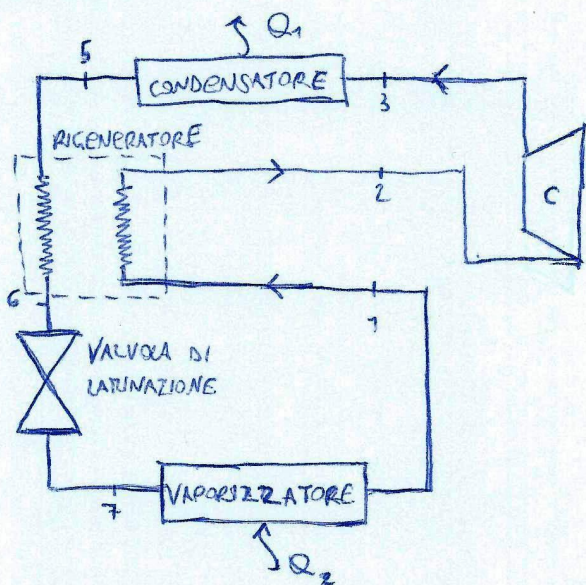
Se il fluido è un composto inorganico il nome è composto da R seguito da un 7, seguito a sua volta dalla massa molecolare (44 per CO_2 , 77 per NH_3 , ecc).

Invece:

- per i derivati del metano si usa: R- $\alpha\beta$, con α numero di atomi di idrogeno più uno e β numero di atomi di fluoro;
- per i derivati dell'etano si usa: R-1 $\alpha\beta$.

Metodi per incrementare l'efficienza

Esistono vari accorgimenti per migliorare le prestazioni degli impianti frigo, come era accaduto nell'analisi del ciclo Rankine: rigenerazione:



Il liquido all'uscita del condensatore viene sottoraffreddato mediante la cessione di calore al vapore in ingresso al compressore, che si surriscalda. Il sottoraffreddamento corrisponde alla trasformazione 5-6, il surriscaldamento alle 7-2 (ΔH_{sott} e ΔH_{surr}). Vale l'equazione di bilancio riferita al rigeneratore:

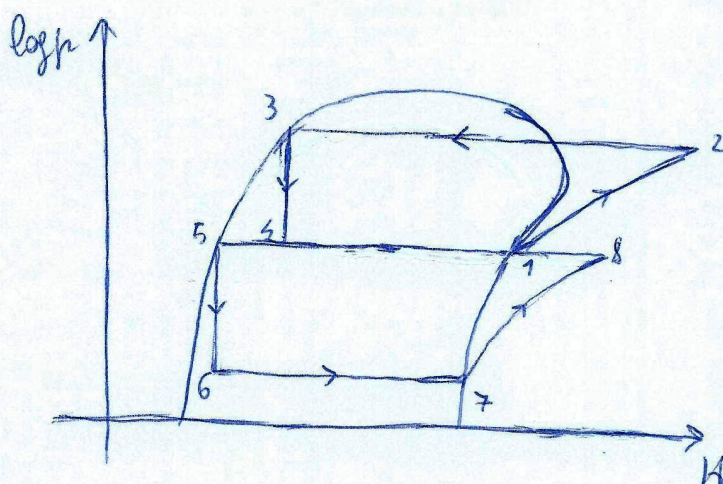
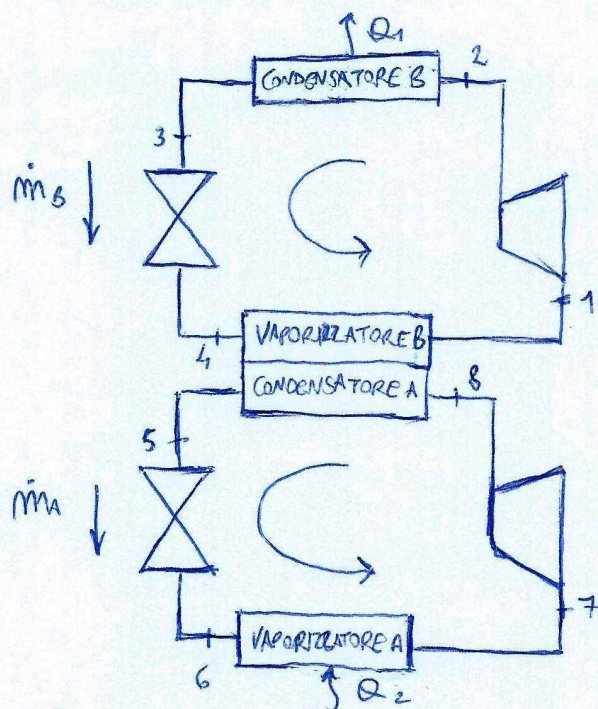
$$H_5 - H_6 = H_2 - H_1$$

Operando con vapore surriscaldato e liquido sottoraffreddato si riduce il rischio di liquido nel compressore e il rischio di bolle nella valvola di laminazione.

Grazie alla rigenerazione il Q_2 aumenta e, di conseguenza, cresce anche il COP. Al contempo, tuttavia, cresce il lavoro al compressore. Quindi può accadere, per eccessiva rigenerazione, che il COP si riduca. Infatti il lavoro da fornire al compressore aumenta man mano che ci si sposta verso destra lungo H:

$$dH = \frac{T}{\rho} ds + v dp \Rightarrow \left(\frac{dH}{dH} \right)_H = \frac{1}{\rho}$$

- cicli frigoriferi in cascata: si accoppiano più cicli con scambiatori intermedi. Schematicamente e graficamente:



Si usa questo sistema quando si vogliono raggiungere temperature molto basse (ad es. -55°C). La temperatura di evaporazione del fluido B è maggiore di quella di condensazione del ciclo A. In tal modo si può realizzare lo scambio di calore tra i due fluidi. Il vaporizzatore A riceve calore realizzando l'effetto frigorifero. Il condensatore B cede tale calore all'esterno.

Si possono usare similmente anche più di due cicli in cascata.

Il coefficiente di prestazione è dato da:

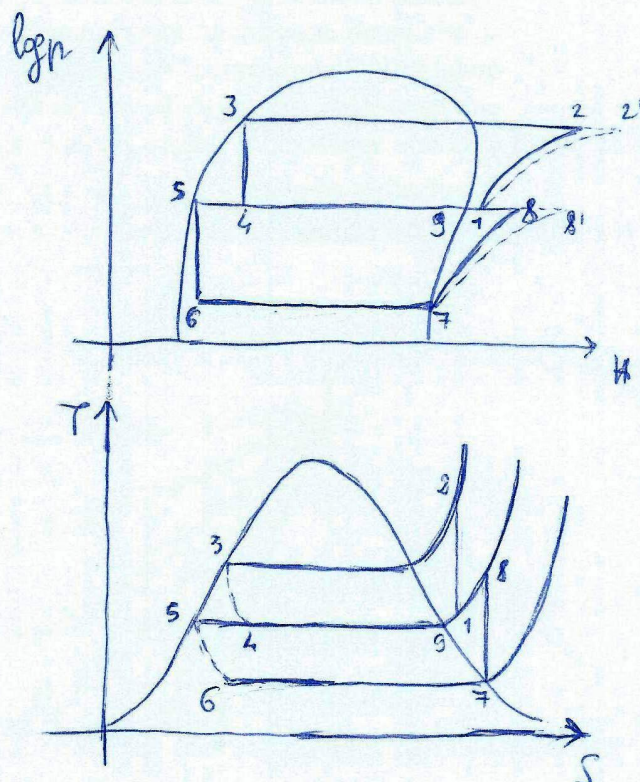
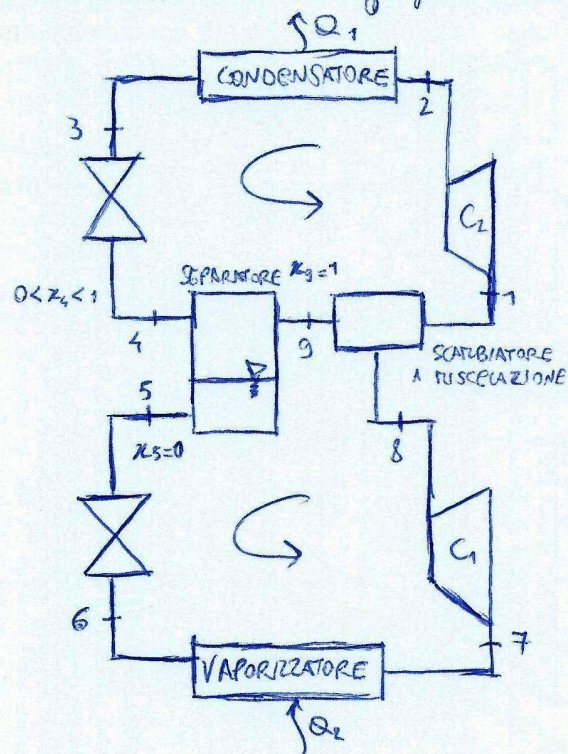
$$\text{COP}_f = \frac{Q_{2,A} \cdot \dot{m}_A}{|L_{2,A}| \dot{m}_A + |L_{2,B}| \dot{m}_B}$$

In generale i due fluidi sono diversi e si ha:

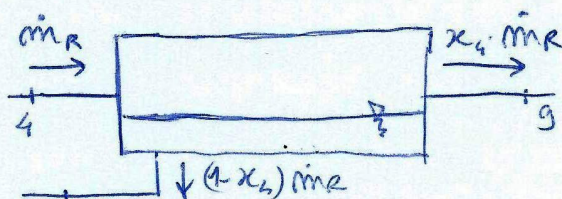
$$\dot{m}_A (h_8 - h_5) = \dot{m}_B (h_1 - h_4)$$

L'uso di fluidi differenti è conveniente per sfruttare al meglio le pressioni di evaporazione e condensazione;

- ciclo frigorifero a compressione di vapore multistadio: se si comprime in più stadi il vapore, con refrigerazione intermedia, il lavoro di compressione si riduce. La refrigerazione viene effettuata sfruttando il fluido frigorifero stesso. Schematicamente e graficamente:



Il vapore in uscita dal compressore 1 ha una certa temperatura che diminuisce grazie alla miscelazione con il vapore, più freddo, proveniente dal separatore. Quest'ultimo ha un ruolo molto importante. È alimentato dal vapore con titolo $0 < x_L < 1$ proveniente dalla valvola di laminazione superiore. Il liquido si accumula nel separatore e procede verso la valvola di laminazione inferiore per poi realizzare l'effetto frigorifero nel vaporizzatore. Il vapore con titolo $x_g = 1$ si dirige verso la miscelazione o miscelazione dove incontra il vapore surriscaldato che ha realizzato l'effetto frigorifero.

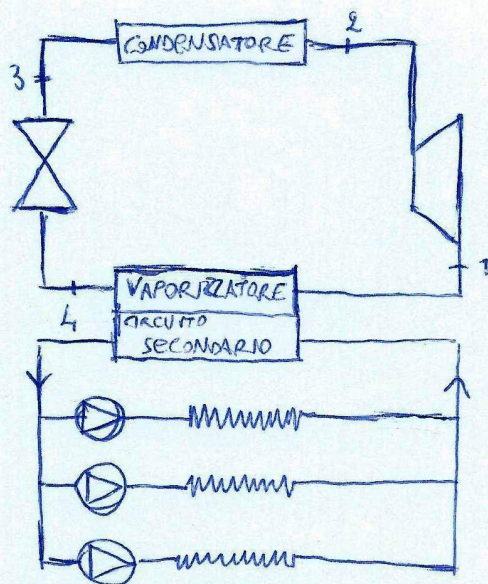


Per definire le portate di fluido envolvente bisogna considerare il titolo x_L . Infine:

$$COP_f = \frac{Q_2}{|L|} = \frac{(h_2 - h_6)(1 - x)}{(h_8 - h_7)(1 - x) + (h_2 - h_1)}$$

Con questo impianto si riescono a raggiungere temperature anche di -60°C .

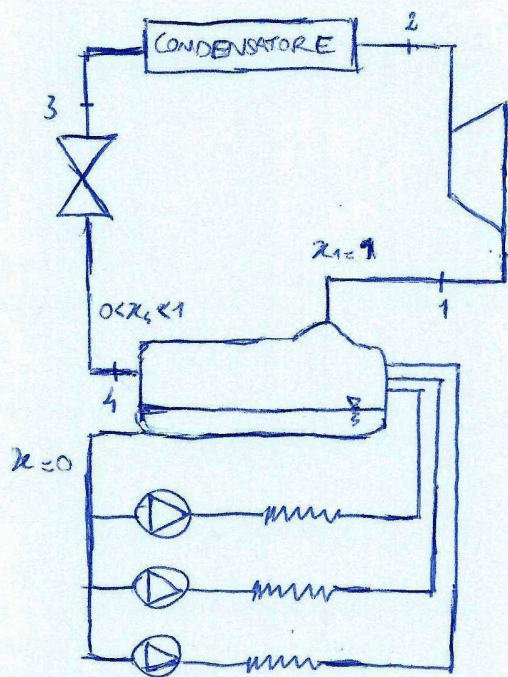
- impianti a salmaia:



Questo impianto si usa quando è necessario alimentare più macchine frigorifere, come nei supermercati. I vari frigoriferi dipendono tutti da un unico circuito secondario che raccoglie il calore emesso da ciascuno e lo rilancia al vaporizzatore del circuito principale. Poi il fluido frigorifero prosegue normalmente verso gli altri organi di macchina. Il fluido deve essere poco viscoso e avere alta capacità dell'entropia per il doppio scamb.

Tuttavia si ha un aumento più basso.

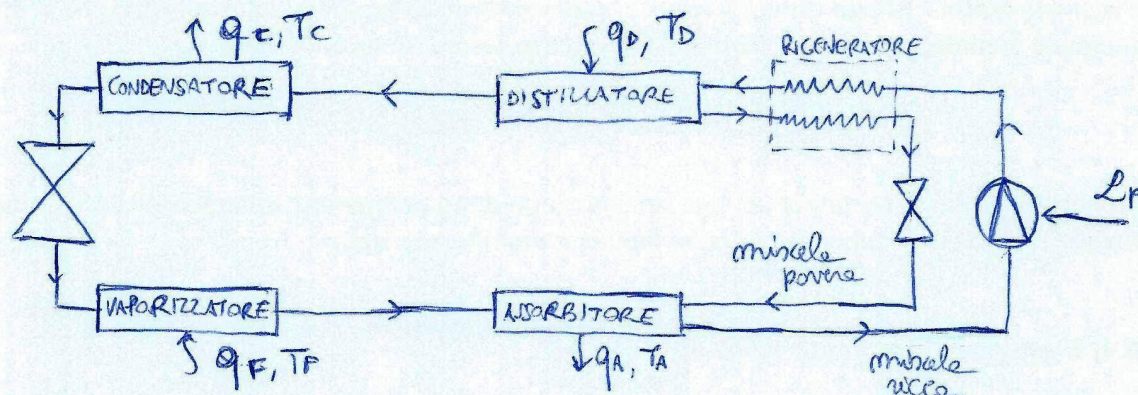
- impianti con separatore:



In questo impianto si preleva il fluido dal separatore con tubo pari a zero. Si preleva quindi il liquido e si può sfruttare tutta l'entalpia di passaggio che dato negli utilizzi successivi.

Ciclo frigorifero ad assorbimento

È un ciclo in cui il compressore viene sostituito da un ciclo costituito da due processi che richiedono meno lavoro, ma un po' più calore. Si devono usare due fluidi, uno dei quali fa da solvente, l'altro da soluto. Coppie solvente/soluto sono H_2O/NH_3 , $LiBr/H_2O$. L'impianto è il seguente:



Consideriamo il caso in cui si utilizzino acqua e ammoniaca. L'ammoniaca circola come in un ciclo a vapore standard attraverso condensatore, valvola di laminazione e vaporizzatore. Quando è nello stato di vapore saturo non passa al compressore, ma al sistema contenente acqua. Nell'assorbimento va a formare una soluzione acquosa di NH_3 . Il processo è esotermico, per questo l'assorbimento viene mantenuto a temperatura sufficientemente bassa. La soluzione di NH_3 viene pompata, con piccolo dispendio di lavoro trattandosi di liquido, nel distillatore, dove libera vapore di ammoniaca. In ingresso al distillatore è la miscela ricca (di NH_3 disciolta), che riceve calore da quella povera in uscita e diretta all'assorbimento. Infatti il processo di rilascio del vapore di NH_3 richiede alta temperatura e il rigeneratore/scambiatore preriscalda la miscela. Tale temperatura è circa 50 gradi al di sopra di quella ambiente.

I vantaggi termodinamici dell'assorbimento non sono rilevanti poiché bisogna fornire molto calore al distillatore. Il sistema assorbitore-distillatore viene quindi sostituito al compressore solo se si hanno a disposizione quantità di calore che verrebbero altrimenti sprecate.

Il coefficiente di prestazione è:

$$COP_f = \frac{q_f}{|q_p| + q_d} \cong \frac{q_f}{q_d}$$

Applichiamo primo e secondo principio:

$$I) \quad q_D + q_F = |q_A| + |q_C|$$

$$II) \quad \frac{q_D}{T_D} + \frac{q_F}{T_F} = \frac{|q_A|}{T_A} + \frac{|q_C|}{T_C}$$

Immaginiamo $T_A = T_C = T_a$, temperatura ambiente:

$$\frac{q_D}{T_D} + \frac{q_F}{T_F} - \frac{|q_A|}{T_a} - \frac{|q_C|}{T_a} = 0 \Rightarrow \frac{q_D}{T_D} + \frac{q_F}{T_F} = \frac{|q_A| + |q_C|}{T_a} = \frac{q_D + q_F}{T_a}$$

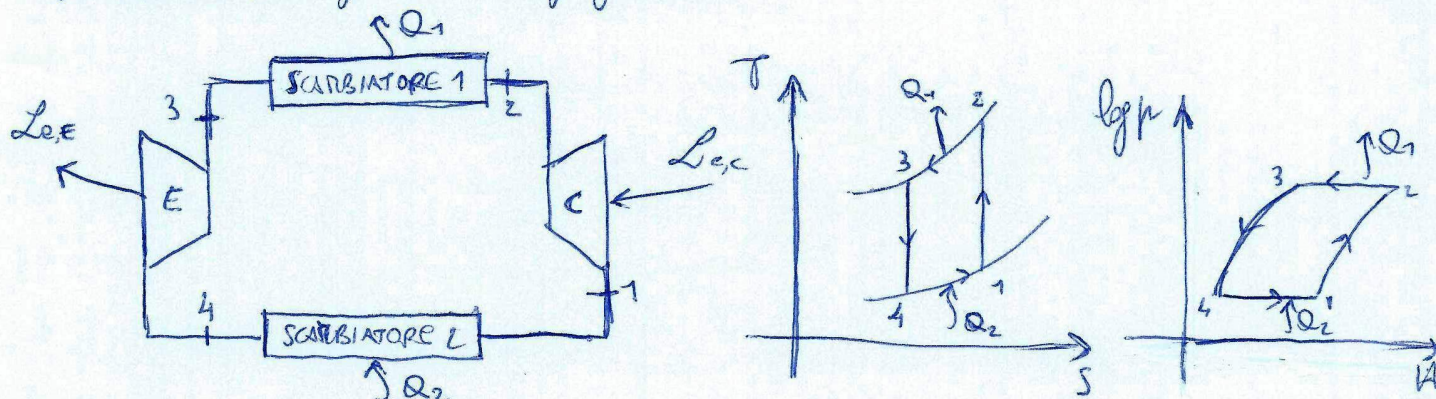
$$\Rightarrow q_D \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_D} \right) = q_F \left(\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_a} \right)$$

Quindi:

$$COP_f = \frac{q_F}{q_D} = \frac{\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_D}}{\frac{1}{T_F} - \frac{1}{T_a}} = \frac{T_F}{T_a - T_F} \cdot \frac{T_D - T_a}{T_D}$$

Cicli frigoriferi a gas

È un tipo di ciclo alternativi, che non prevedono passaggi di stato del fluido refrigerante:



Il ciclo è composto da due adiabatiche e due isobare. È l'inverso di un ciclo Brayton. Si hanno:

$$L_{ee} = H_3 - H_4 = C_p(T_3 - T_4) \quad L_{ec} = H_1 - H_2 = C_p(T_1 - T_2)$$

$$Q_2 = H_1 - H_4 = C_p(T_1 - T_4)$$

Il coefficiente di prestazione è allora:

$$\begin{aligned} COP_f &= \frac{Q_2}{L_{ee} + L_{ec}} = \frac{Q_2}{-L_{ee} - L_{ec}} = \frac{T_1 - T_4}{T_4 - T_3 + T_2 - T_1} = \\ &= \frac{T_1 - T_4}{(T_4 - T_1) + (T_2 - T_3)} = \frac{1}{\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} - 1} = \frac{1}{\frac{T_2(1 - T_3/T_2)}{T_1(1 - T_4/T_1)} - 1} \end{aligned}$$

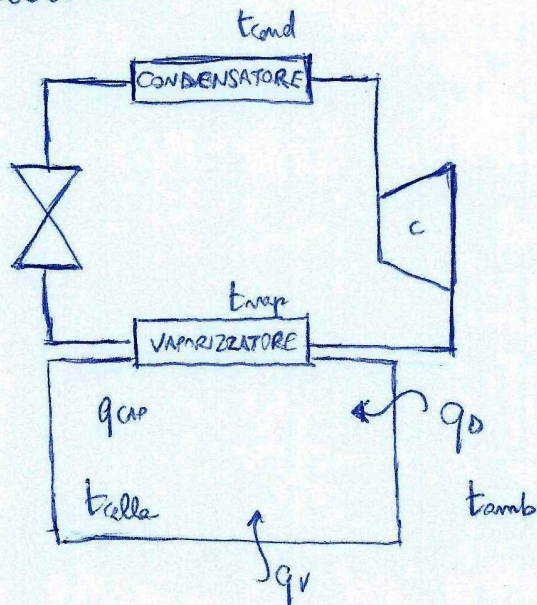
Come dimostratosi parlando del ciclo Brayton $\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$;

$$COP_f = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} \quad \text{ponendo } r_p = \frac{p_2}{p_1}; \quad COP_f = \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

Il COP_f si riduce aumentando la differenza di temperatura.

Impianto frigo e celle

Consideriamo l'impianto frigo in relazione alla cella da raffreddare:



Il flusso termico frigorifero deve essere pari a:

$$Q_F = Q_D + Q_V + Q_S + Q_{cap}$$

In cui $Q_{cap} = c \cdot M \cdot \frac{dT}{dt}$ è il flusso da asportare dovuto ai cibi che mettiamo nella cella (Q_{cap} capabino). Q_S è il flusso dovuto alle sorgenti presenti nell'ambiente (persone, ad esempio, se abbiamo un condizionatore). Infine Q_V

e Q_D sono i flussi provenienti dall'ambiente esterno.

In condizioni stazionarie $Q_{cap} = 0$ e quindi:

$$Q_F = Q_D + Q_V + Q_S$$

Parlando delle temperature si ha:

$$t_{cond} = t_{amb} + 5 \div 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{evap} = t_{cella} - 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pompe di calore

Le pompe di calore sono concettualmente simili ai frigoriferi, ma operano con temperature diverse e con finalità diverse. Il loro obiettivo è quello di mantenere a una temperatura elevata un ambiente, non di conservare il freddo in una cella. Riescono a sottrarre calore all'ambiente esterno per riscaldare quello interno. Possono funzionare per il riscaldamento d'inverno e, con opportune valvole che invertano il ciclo, anche per la refrigerazione estiva. Per il coefficiente di prestazione si ha:

$$COP_{HP} = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = COP_f + 1$$

È utile un confronto tra pompe di calore e caldaie tradizionali. Dobbiamo introdurre il concetto di energia primaria, cioè l'energia massima che gli impianti sono in grado di sviluppare. Consideriamo il flusso generato dall'energia primaria e lo moltiplichiamo per un coefficiente (η o η_b) che lo riduce ed esprime quindi il flusso reale. Per la pompa di calore:

$$(Q_c)_{HP} = (Q_{en\text{ primaria}})_{HP} \cdot \eta \cdot COP_{HP}$$

Per la caldaia tradizionale:

$$(Q_c)_{caldaia} = (Q_{en\text{ primaria}})_{caldaia} \cdot \eta_b$$

In cui:

$$\eta_b = 1 - \frac{\dot{m}_{fumi} \cdot C_p (T_{fumi} - T_{amb})}{\dot{m}_c \cdot PCI}$$

Con PCI = potere calorifico inferiore del combustibile.

Uguagliamo:

$$(Q_{en\text{ primaria}})_{HP} \cdot \eta \cdot COP_{HP} = (Q_{en\text{ primaria}})_{caldaia} \cdot \eta_b$$

$$\Rightarrow \frac{(Q_{en\text{ prim}})_{HP}}{(Q_{en\text{ prim}})_{caldaia}} = \frac{\eta_b}{\eta} \cdot \frac{1}{COP_{HP}} \approx \frac{2}{COP_{HP}}$$

Dato che $COP_f > 1 \Rightarrow COP_{HP} = COP_f + 1 > 2 \Rightarrow \frac{2}{COP_{HP}} < 1$. Quindi il calore ricavato da una caldaia tradizionale è sempre maggiore di quello ricavato da una pompa di calore!